

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika Instituut

Grete-Lilijane Küppas

KOSMILINE GAAS SUUREMASTAABILISES STRUKTUURIS

Magistritöö (30 EAP)
Füüsika

Juhendajad:
Antti Tamm, PhD
Elmo Tempel, PhD

Tartu 2019

Kosmiline gaas suuremastaabilises struktuuris

Käesolev magistritöö uurib EAGLE simulatsiooni põhjal kosmilise gaasi ja filamentaarse struktuuri vahelisi seoseid. Töös leitakse, et kogu galaktikatevahelisest gaasist asub rohkem kui kolmandik Bisous' mudeliga leitud filamentaarses struktuuris. See struktuur võtab enda alla vähem kui 7% kogu simulatsiooniruumist. Lisaks näidatakse filamentaarses struktuuris asuva gaasi massijaotust temperatuuri järgi ning erinevatel temperatuuridel oleva gaasi tõenäosust asuda filamentaarses struktuuris.

Märksõnad: kosmoloogia, suuremastaabiline struktuur, filamendid, galaktikatevaheline keskkond, kosmiline gaas

CERCS: P520 — Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

Cosmic gas in the large-scale structure

The thesis on hand explores how the intergalactic medium is related to the filamentary pattern that we observe in the large-scale structure of the Universe. Filaments take up less than 7% of the total volume, but we find that more than a third of the gas in the intergalactic medium is located in Bisous' filaments. In addition, we present the gas mass and probability distributions in filaments depending on temperature.

Keywords: cosmology, large-scale structure, filaments, intergalactic medium, cosmic gas

CERCS: P520 — Astronomy, space research, cosmic chemistry

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Teoreetiline taust	7
1.1 Standardmudel kosmoloogias	7
1.1.1 Plancki satelliit	8
1.2 Universumi struktuur	8
1.2.1 Galaktikate grupid ja parved	9
1.2.2 Filamendid, tühikud, sõlmed, seinad ja müürid	9
1.2.3 Kosmiline gaas	11
1.2.4 Kosmilise kõrgstruktuuri kaardistamine	13
2 Andmed ja meetodid	14
2.1 EAGLE	14
2.1.1 Andmed	15
2.2 Bisous' mudel	16
2.2.1 Sageduskaart (<i>visit map</i>)	17
2.2.2 Andmed	17
2.3 Bootstrap-meetodi rakendamine	18
2.4 Andmete ettevalmistamine	18
2.4.1 Bisous' mudeli andmete ja EAGLE-i simulatsiooni andmete kokkupanek	18
2.4.2 Lõplikud andmed	20
3 Tulemused	22
3.1 Filamendi tõenäosusväli	22
3.2 Gaasi massijaotus EAGLE simulatsioonis	23
3.3 Gaasi massijaotus filamentides	25
3.3.1 Gaasi temperatuurivahemikud massiprotsendi järgi	27
3.4 Gaasi filamendis asumise tõenäosus	28

Kokkuvõte	32
A Bootstrap-meetod	33
A.1 Valimi suurus ja valimite arv	33
A.2 Algoritmi kirjeldus	33
Tänuavaldused	35
Kirjandus	36
Lihtlitsents	39

Sissejuhatus

Vaadeldes Universumit suurtel mastaapidel¹, märkame, et galaktikad on kogunenud tihedatesse piirkondadesse - sõlmedesse, mis on omavahel ühendatud galaktikate jadadega, mida nimetame filamentideks. Selline struktuur on näha kogu vaadeldavas Universumis.

Suuremastaabiline struktuur sai alguse juba varajasest Universumist, kui tumeaine hakkas gravitatsiooni mõjul kokku kukkuma. Bariönaine² liikus gravitatsioonilise tõmbe tõttu tumeaine poolt moodustatud massiivsetesse piirkondadesse ja neid piirkondi ühendavatesse filamentidesse.

Kosmoloogilisel punanihkel $z < 1$ ³ on filamentides bariönainet juba nii palju, et nende omavahelise pörkumise tõttu hakkab keskkonna temperatuur märkimisväärselt tõusma. Mõned varasemad tööd on näidanud, et see temperatuur võib olla vahemikus $10^5 \text{ K} - 10^7 \text{ K}$ (Bregman, 2007).

Käesoleva töö eesmärk on uurida, kuidas on gaas ja filamendid omavahel seotud. Filamentide tuvastamiseks kasutame stohhastilist Bisous' mudelit, mis otsib filamente galaktikate jaotuse põhjal.

Keskendume peamiselt galaktikatevahelisele gaasile (*Intergalactic medium* - IGM), mida on otsestest vaatlustest keeruline uurida, ja seetõttu kasutame siin töös kosmoloogilise simulatsiooni EAGLE andmeid.

Kasutades EAGLE-i simulatsioonist saadud gaasi andmeid ja Bisous' mudeli abil arvutatud filamentaarse struktuuri tõenäosusvälja, soovime leida vastuseid järgmistele küsimustele.

1. Kas ja millises mahus järgib gaasijaotus galaktikate jaotuse põhjal leitud filamente?
2. Millise temperatuurijaotusega on gaas filamentides?
3. Millise temperatuuriga gaas järgib kõige paremini filamente?

¹Siin ja edaspidi peame suurte mastaapide all silmas megaparsekite suuruseid ja suuremaid struktuure ($1 \text{ Mpc} \approx 3,26 \text{ Mly}$).

²Kosmoloogid mõtlevad bariönaine all nähtavat ainet.

³Universum on kosmoloogilisel punanihkel $z = 1$ u $5,9 \cdot 10^9$ aastat vana.

Magistritöö on jaotatud kolmeks peatükiks. Esimeses peatükis anname lühiülevaate praegusest standardmudelitest kosmoloogias, tutvustame suuremastaabilise struktuuri põhilisi komponente ning räägime pikemalt kosmilisest gaasist. Teises peatükis anname ülevaate andmetest ja meetoditest, mida kasutasime, et vastata uurimusküsimustele. Kolmandas peatükis esitame magistritöö tulemusi, kus muuhulgas näitame gaasi massijaotust filamentaarses struktuuris temperatuuri järgi.

1 Teoreetiline taust

1.1 Standardmudel kosmoloogias

Kosmoloogia põhineb kosmoloogilisel printsiiibil, mis ütleb, et Universum on homogeenne¹ ja isotroopne², ning Einsteini üldrelatiivsusteooria järelدusel, et aegruumi struktuur sõltub Universumi massijaotusest. Need eeldused viivad välja arusaamani kosmoloogiast kui teadusest, mille määravad üldjoontes kaks parameetrit: Universumi kõverus K ja skaalafaktor $a(t)$. Skaalafaktor iseloomustab Universumis mõõdetavate pikkuste skaala muutumist ajas. Tänapäeval on kosmoloogia üks põhiülesandeid määrata kõveruse K väärtust ja skaalafaktori $a(t)$ kuju.

Hetkel enim aktsepteeritud kosmoloogilistes mudelites lähtutakse seisukohast, et Universum koosneb kolmest põhikomponendist: barüonainest, tumeainest ja tumeenergiast. Barüonaineiks nimetavad kosmoloogid nähtavat Universumit, mille moodustavad footonid³, prootonid, neutronid ja elektronid⁴. Tumeaine ja tumeenergia olemus on siiani täpselt teadmata, kuid vaatluste põhjal on leitud, et need moodustavad u 95% Universumi energiatihedusest (Planck Collaboration, 2018).

Kosmoloogilised mudelid erinevad üksteisest peamiselt selle poolest, kui suure osa energiatihedusest moodustavad barüonaine, tumeaine ja tumeenergia mudelis kirjeldatud Universumis, ning mis on tumeaine ja tumeenergia olemus (Mo et al., 2010). Käesoleva töö kirjutamise hetkel on kõige populaarsemaks kosmoloogiliseks mudeliks Λ CDM Universum.

Λ CDM mudel kirjeldab kiirenevalt paisuvat tasast Univerumit, mis sai alguse Suure Pauguga ja millest ca 68% moodustab Λ , ca 27% "külm" tumeaine (CDM - "cold" dark matter) ja ca 5% barüonaine.

¹Vaatlejale paistab Universum suurel skaalal asukohast sõltumatult samasugune.

²Vaatlejale paistab Universum suurel skaalal samasugune igas suunas.

³Kuigi footon on boson ja mitte barüon, siis kosmoloogid räägivad ka footonitest, kui nad mainivad barüonainet. Käesolevas töös me teeme samamoodi.

⁴Kuigi elektron on lepton ja mitte barüon, siis kosmoloogid räägivad ka elektronidest, kui nad mainivad barüonainet. Käesolevas töös me teeme samamoodi.

Λ on kosmoloogiline konstant s.o energia komponent, mille tihedus aja jooksul ei muutu. (Mo et al., 2010)

Tumeaine on Λ CDM mudelis "külm", kuna vaatlused toetavad mudelit, kus galaktikad on tekkinud ja arenenud tumeaine halode sees. See seab piirangud tumeaine temperatuurile, kuna tumeaine halo aine kiiruste jaotus peab olema palju väiksem kui halos oleva galaktika nähtava aine kiiruste jaotus. Vastasel juhul ei saaks tumeaine püsida galaktikate ümber.

1.1.1 Plancki satelliit

Plancki satelliit oli Euroopa kosmoseagentuuri kolmanda põlvkonna kosmosemissioon, mille eesmärgiks oli uurida varast Universumit ja selle evolutsiooni. Satelliit tegutses vahemikus 14.05.2009 kuni 23.10.2013 ja mõõtis kosmilist mikrolaine taustkiirgust (CMB) sagedusvahemikus 30 – 857 GHz üle kogu taeva (Planck Collaboration, 2018).

CMB koosneb varasest Universumist pärinevatest footonitest, mis on homogeenelt kõikjal meie ümber. Vaadeldes CMB temperatuuri on seal näha mikrokelvini skaalal häiritusi. Need häiritused on hetkel meie parimaks võimaluseks uurida varajast Universumit ja struktuuride teket.

CMB põhjal arvutas Plancki kollaboratsioon Λ CDM mudeli parameetrite väärtused, mida kasutab ka EAGLE simulatsioon, millel käesolev töö põhineb. Need väärtused on välja toodud tabelis 2.1.

1.2 Universumi struktuur

Me elame Universumis, kus aine jaotus on suurel skaalal väga ebahürtlane. Galaktikad, galaktikatevaheline gaas ja tumeaine moodustavad tihedaid ja kompaktseid sõlmi (*knots*), pikki väljavenitatud filamente ja tühikute (*voids*) ümber paiknevaid seinu (*sheets*). Sõlmedes asuvad suuremad galaktikaparved, mis on omavahel ühendatud filamentide ja seintega. Selline struktuur on näha kogu vaadeldavas Universumis (Libeskind et al., 2018). Eesti keeles kutsume seda kärgstruktuuriks.

Kärgstruktuuri on nähtud juba alates lähedases Universumis asuvate galaktikate kaardistamise algusest (Jõeveer et al., 1978) ja seda on kinnitanud hilisemad galaktikate punanihete mõõtmised (2dFGRS (Colless et al., 2003), Sloani digitaalne taevaülevaade (Tegmark et al., 2004), 2MASS punanihke uuring (Huchra et al., 2012)). Nähtav kärgstruktuur on struktuuritekke teooriaga hästi kooskõlas. Kärgstruktuuri on näha ka kosmoloogilistes N-keha simulatsioonides, mis põhinevad struktuuritekke teooriatel (Springel et al., 2005).

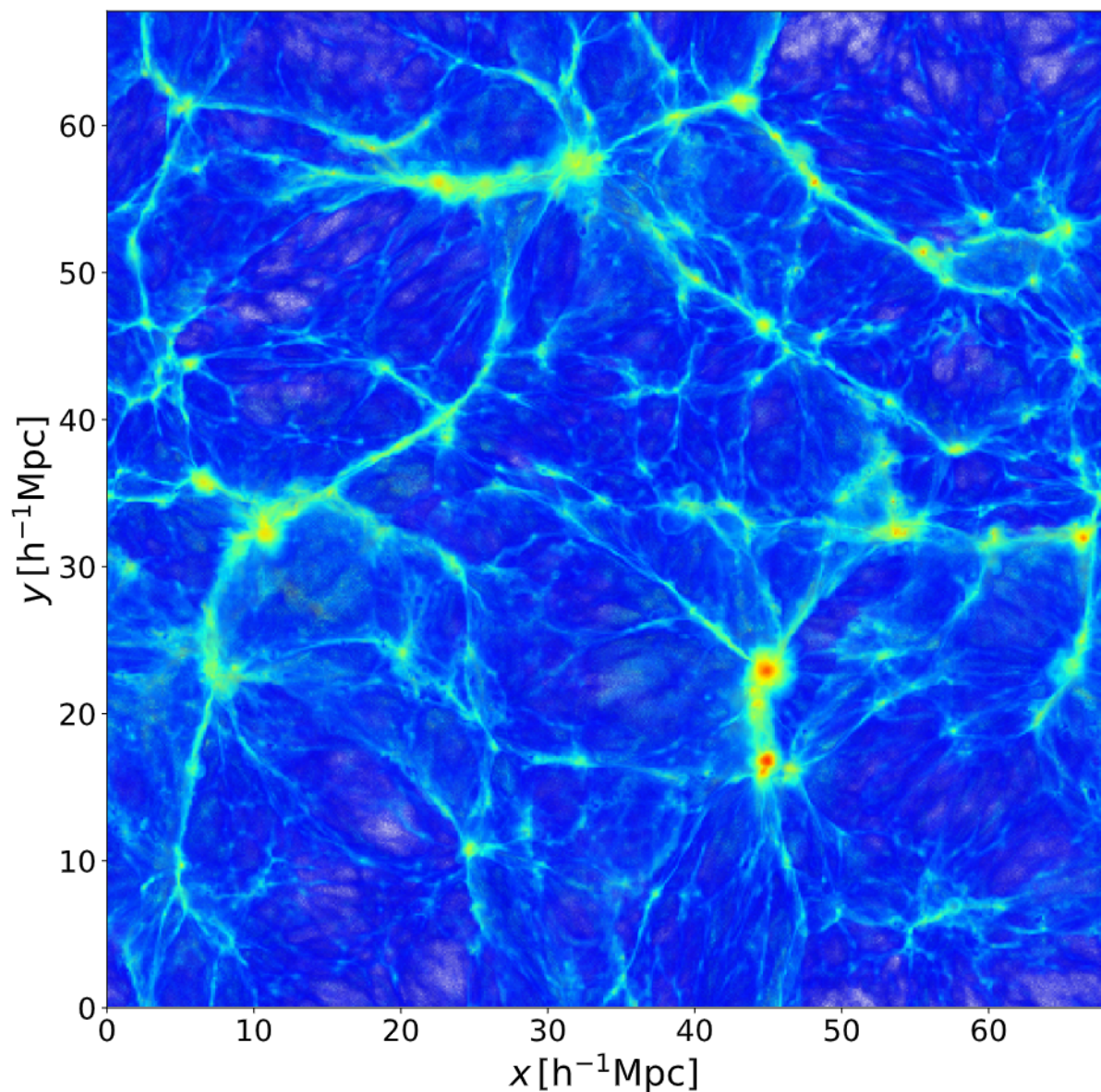
1.2.1 Galaktikate grupid ja parved

Suur osa galaktikatest Universumis asuvad galaktikate gruppides või parvedes, kus galaktikate numbriline tihedus on kümneid ja sadu kordi suurem kui Universumis keskmiselt. Suuremaid galaktikate kogumeid nimetatakse parvedeks. Parvedes võib leida rohkem kui 50 heledat galaktikat mõne kuup-megaparsekisuuruses ruumalas. Väiksemaid galaktikate kogumeid nimetatakse gruppideks. Grupid ja parved on meie Universumi suurimad virialiseerunud⁵ struktuurid. (Mo et al., 2010)

1.2.2 Filamendid, tühikud, sõlmed, seinad ja müürid

Filamendid on ühed silmapaistvamad struktuurid megaparseki skaalal. Nad on ühenduslülid Universumi tihedaimate piirkondade - sõlmede - vahel. Mööda filamente toimub galaktikate, gaasi ning tumeaine liikumine sõlmedesse (Knebe et al., 2004). Filamente ja kompaktseid sõlmi saab näha joonisel 1.1.

⁵Gravitatsiooniliselt stabiilsed süsteemid.



Joonis 1.1: EAGLE simulatsioonist võetud gaasi massijaotuse $6,77h^{-1}\text{Mpc}$ paksune lõik. Jooniselt on näha, et suur osa gaasist koguneb sõlmedesse, mida ühendavad omavahel peenemad struktuurid - filamendid.

Tühikud on samuti suurel skaalal kergesti märgatavad struktuurid. Tühikud jäävad suurusjärku $20 - 50h^{-1}\text{Mpc}$, kus h on dimensionoonitu Hubble'i parameeter ⁶. Tühikutes ei leidu peaaegu

⁶Hubble'i parameeter iseloomustab Universumi suhtelist paisumiskiirust

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}.$$

Hubble'i parameetrit tutvustati koos Hubble'i seadusega, mis ütleb, et mida kaugemal objektid meist asuvad, seda kiiremini nad meist eemalduvad. Hubble'i parameetri tänapäevast väärtust kutsutakse Hubble'i konstandiks ja tähistatakse H_0 -ga. Suurused, mis sõltuvad Hubble'i parameetrist, kirjutatakse tavaliselt koos dimensionoonitu

üldse galaktikaid ja nad võtavad enda alla suurema osa Universumi ruumalast (van de Weygaert, 2014).

Seinad on õhukesed lehetaolised struktuurid, mida on galaktikate jaotuse järgi hulga keerulisem leida. Seintes asuvad galaktikad hõredamalt ja enamasti on need väiksema heledusega (Cautun et al., 2014).

Lisaks õhukestele seintele on leitud galaktikate parvedest moodustunud lamedaid superparvede struktuure, mida nimetatakse suurteks müürideks (*Great Walls*). Tähelepanuväärsemad müürid on CfA Great Wall (GELLER and HUCHRA, 1989), Sloan Great Wall (Gott et al., 2005) ja BOSS Great Wall (Lietzen et al., 2016).

1.2.3 Kosmiline gaas

Tähed ja teised kompaktsed objektid nagu tähejäänukid, pruunid kääbused ja planeedid moodustavad vähem kui 10% Universumi barüonainest, mida on ennustanud mikrolaine taustkiirguse vaatlused ja ürgse tuumasünteesi mudel. Ülejäänud osa barüonainest arvatakse olevat gaasi kujul suuremastaabilises struktuuris.

Kosmilist gaasi eristatakse sõltuvalt keskkonnast, kus ta asub. Astrofüüsikud räägivad galaktikasisesest gaasist, galaktikat ümbritsevas tumeaine halos leiduvast gaasist, galaktikaparvedes asuvast gaasist ja galaktikatevahelisest gaasist.

Galaktikatesisest gaasi nimetatakse tähtedevaheliseks keskkonnaks (*interstellar medium* - ISM). Halo gaas asub galaktikaid ümbritsevas tumeaine halos (*circumgalactic medium* - CGM) ja parvedes olev gaas asub galaktikate vahel parvesiseses keskkonnas (*intracluster medium* - ICM). Galaktikatevaheline gaas (*intergalactic medium* - IGM) jagatakse kaheks komponendiks: hajus galaktikatevaheline keskkond (*diffuse intergalactic medium* - DIM), kus gaasi temperatuur on $T < 10^5$ K, ja hajus soe-kuum galaktikatevaheline keskkond (*warm-hot intergalactic medium* - WHIM), kus gaas jääb temperatuurivahemikku $10^5 - 10^7$ K. (Mo et al., 2010)

Galaktikate evolutsiooni käigus interakteeruvad erinevad keskkonnad aktiivselt omavahel. Halo gaas jahtub ja see kukub galaktikatesse ning tähtedevaheline gaas puhutakse galaktikast välja galaktilise tuulega⁷. Mõnikord tõmmatakse gaas galaktikast välja ka galaktikat ümbritseva

Hubble'i parameetriga

$$h \equiv \frac{H_0}{100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}}.$$

⁷Galaktiline tuul koosneb kõrge energiaga laetud osakestest, mis liiguvad suurel kiirusel galaktikatevahelises keskkonda. Galaktilist tuult tekitavad enamasti aktiivsete galaktikate tuumad (*active galactic nuclei* - AGN) või massiivsete tähtede poolt tekitatud tähetuul (*stellar winds*) ja supernoovade plahvatused. Galaktiline tuul võib olla niivõrd tugev, et gaas satub ka tumeaine halost välja.

keskkonna poolt, kui galaktika suurel kiirusel liigub. Toimub ka gaasi liikumine gravitatsioonilise kollapsi tõttu galaktikatevahelisest keskkonnast parvedesse, halodesse ja galaktikatesse. (Mo et al., 2010)

IGM

IGM-il on tähtis osa galaktikate evolutsioonis. Enne tähtede ja galaktikate moodustumist asusid kõik barüonid galaktikatevahelises keskkonnas. Universumi vananedes liikus rohkem gaasi tumeaine halodesse, kus see koondus omakorda galaktikatesse.

Galaktikatevahelist keskkonda uuritakse vaatluste abil kahel moel: vaadeldakse keskkonna kiirgusvälja või mõõdetakse taustallikate kiirguse neeldumist galaktikatevahelise keskkonna tõttu. Galaktikatevahelise keskkonna uurimine on oluline, kuna see aitab meil paremini mõista galaktikate tekke- ja arengumehhanisme. Lisaks võib galaktikatevahelise keskkonna uurimine anda meile aimu protsessidest, mis leidsid aset pärast rekombinatsiooni⁸, ning anda korrektsema pildi kosmilisest mikrolaine taustkiirgusest.

Kahjuks pole IGM-s asuva WHIM-i detekteerimine vaatluste kaudu lihtne ja seega on gaasi uurimine suuremastaabilises struktuuris raskendatud. Temperatuuril $10^5 - 10^7$ K on gaas peaaegu täielikult ioniseerunud. See tähendab, et WHIM-i ei saa hästi uurida mõõtes taustallikate neeldumist. Lisaks on WHIM väga hõre ja seetõttu on seda raske uurida UV- ja röntgenkiirguses. Hetkel on WHIM-i üheks parimaks uurimisvõimaluseks kosmoloogilised simulatsioonid.

ICM

Galaktika parvedes olev gaas on väga kuum. Selle temperatuur jääb vahemikku $10^6 - 10^8$ K ja seetõttu saame parvi vaadelda röntgenkiirguses. Parvedes olev gaas on eeskätt ioniseeritud vesinik ja heelium, mida on metallidega rikastanud supernoova plahvatused, kvasarid ja aktiivsete galaktikate tuumad.

CGM

Vaatlused on näidanud, et massiivseid galaktikaid ümbritseb suure tihedusega $n > 1 \text{ cm}^{-3}$ ioniseeritud suhteliselt külm gaas $T \sim 10^4$ K (Cantalupo, 2017). See gaas asub galaktikaid ümbritsevas tumeaine halos.

⁸Rekombinatsioon leidis Λ CDM mudeli kohaselt aset ca 380 000 aastat pärast Suurt Pauku, kui Universum oli piisavalt jahtunud, et ioonid ja elektronid said "rekombineeruda" aatomiteks ja ürgsed footonid vabanesid aimest. Neid footoneid vaatleme praegu kosmilise mikrolaine taustkiirgusena.

1.2.4 Kosmilise kargstruktuuri kaardistamine

Kosmilise kargstruktuuri süstemaatiline uurimine on oluline mitmel põhjusel. Kargstruktuuri kvantitatiivne analüüs saab anda informatsiooni Universumi struktuuri tekkest, tumeaine ja tumeenergia olemusest ning galaktikate tekke ja arengu protsessidest.

Mitmed tööd on näidanud, et galaktikate areng on tugevas sõltuvuses ümbritsevast keskkonnast (Aragon-Calvo et al., 2016). Uurimaks täpsemini galaktikate evolutsiooni mõjutavaid protsesse on ülimalt oluline eristada ja kaardistada galaktikaid ümbritsevat keskkonda.

Struktuuride leidmine kosmilisest kargstruktuurist on keeruline ülesanne ja selleks on loodud mitmeid meetodeid, mille kohta saab rohkem lugeda artiklist Libeskind et al. (2018).

Meie kasutame oma töös filamentide detekteerimiseks stohhastilist Bisous' mudelit, mis otsib filamente galaktikate jaotuse põhjal.

2 Andmed ja meetodid

2.1 EAGLE

EAGLE (*Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments*) on kosmoloogiline simulatsioon, mille eesmärgiks on uurida, kuidas galaktikad tekivad ja arenevad. Simulatsioon algab kui Universum on veel väga ühtlase tihedusega ja ühtegi tähte ega galaktikat pole veel tekkinud. Simulatsioon toimub Λ CDM Universumis ja kasutab Plancki satelliidi vaatlusandmetest saadud kosmoloogiliste konstantide väärtusi (Schaye et al., 2014). Kasutatavad väärtused on välja toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1: EAGLE simulatsioonis kasutatavad kosmoloogilised parameetrid: Ω_m , Ω_Λ ja Ω_b on aine, tumaenergia ja barüonaine keskmised energiatihedused kriitilise tiheduse ühikutes kosmoloogilisel punanihkel $z = 0$; H_0 on Hubble'i konstant käesoleval hetkel; σ_8 on silutud massijaotuse standardhälve 8 Mpc/h sfääris; n_s on varajases Universumis tekkinud adiabaatiliste häirituste võimsusspektri astmeseaduse astendaja; Y on heeliumi osakaal varajases Universumis.

Kosmoloogilised konstandid	Väärtus
Ω_m	0.307
Ω_Λ	0.693
Ω_b	0.04825
$h \equiv H_0 / (100 \text{ kms}^{-1} \text{ Mps}^{-1})$	0.6777
σ_8	0.8288
n_s	0.9611
Y	0.248

EAGLE simulatsioon on hüdrodünaamiline simulatsioon, mis põhineb galaktikate teket mõjutavatel füüsikalistel protsessidel. See arvestab kiirgusliku jahtumise, tähe massi muutumise ja metallidega rikastumisega. Lisaks arvestab see energia tagasisidet tähetekke protsessides, gaasi akretsioonil mustadesse aukudesse ja mustade aukude kokkupõrgetel. Nende protsesside efektiivsus on kalibreeritud nõnda, et simulatsiooni tulemus oleks kooskõlas kosmoloogilisel punanihkel $z \sim 0$ nähtava Universumiga. Simulatsiooni protsesside efektiivsust kalibreeriti

vaatlusandmetest leitud galaktika tähtede massifunktsiooni, galaktikate suuruste jaotuse ja vaadeldud galaktika ning galaktika keskse musta augu massi suhte järgi (Crain et al., 2015). EAGLE simulatsioon demonstreerib kosmoloogide parimat arusaama struktuuri ja galaktikate tekkimisest.

2.1.1 Andmed

Selles töös kasutatakse EAGLE simulatsiooni Ref-L0100N1504. Algselt on perioodilises simulatsiooniruumis¹ 1504^3 tumeaineosakest ja sama palju barüonaine osakesi. Simulatsiooniruum on kuubikujuline ja ühe külje pikkus simulatsioonis Ref-L0100N1504 on $67,7 h^{-1} \text{Mpc}$. Iga tumeaineosakese mass on $6,57 \cdot 10^6 h^{-1} M_{\odot}$ ja gaasiosakese esialgne mass on $1,2 \cdot 10^6 h^{-1} M_{\odot}$ (Schaye et al., 2014).

Osakeste andmed tulevad simulatsioonist hetktõmmistena (*snapshot*), mis kirjeldavad süsteemi konfiguratsiooni erinevatel kosmoloogilistel punanihetel. Kokku on 29 hetktõmmist punanihete vahemikus $z = 20$ kuni $z = 0$. Siin töös kasutame andmeid punanihkelt $z = 0$, mis on käesolev hetk Universumis. Iga hetktõmmis on jaotatud mitmete failide peale laiali ja need failid on binaarses HDF5 formaadis.

Simulatsioonis nimetatakse osakesteks nii gaasi, tumeainet, tähti kui ka musti auke. Nende eristamiseks on osakestel juures parameeter `PartType0` – 5.

Meile huvipakkuvateks parameetriteks on veel koordinaadid, temperatuur, mass, grupi number (*GroupNumber*) ja alamgrupi number (*SubGroupNumber*). Need parameetrid on kokku võetud tabelis 2.2.

Osakeste koordinaadid on kaasaliikuvad² ja antud ühikutes $h^{-1} \text{Mpc}$. EAGLE simulatsioonis on temperatuurile seatud alampiir, mis on $T > 100 \text{K}$. Temperatuur arvutatatakse mudeli järgi igale osakesele kõikide kosmoloogiliste punanihete jaoks. (The EAGLE team, 2017)

Halod leitakse EAGLE simulatsioonist kasutades ”sõprade-sõbrad” (*friends-of-friends* - FoF) (Turner and Gott, 1976) ja sfäärilisi tihedusväljade (*spherical over-density*) (Lacey and Cole, 1994) algoritme. Neid algoritme kasutatakse tumeaineosakeste peal. Barüonaineosakesed määratakse sellesse halosse, kus asub talle lähim tumeaineosake. Osakeste halosse kuulumist

¹Kosmoloogilised simulatsioonid simuleerivad vaid väikest osa Universumist. Simulatsioon toimub simulatsiooni kastis. Jälgendamaks Universumi lõpmatust, kasutatakse perioodilisi ääretingimusi: osakesed, mis lahkuvad kastist ühest küljest, sisenevad kasti koheselt vastasküljest.

²Kaasaliikuv koordinaatsüsteem suureneb koos Universumi paisumisega ja seetõttu kaotab ära Hubble'i paisumisest tuleneva efekti, mistõttu kaugemad galaktikad on suurema punanihkega. Kaasaliikuv koordinaatsüsteemis asuv vaatleja näeb Universumit enda ümber isotroopsena ja punanihe ei sõltu kaugusest. Kaks objekti, mille omakiirused (*peculiar velocity*) on nullid, asuvad kaasaliikuv koordinaatsüsteemis erinevatel ajahetkedel üksteisest samal kaugusel.

Tabel 2.2: EAGLE simulatsioonist kasutatavad osakeste parameetrid.

Parameeter	Ühik	Selgitus
Koordinaadid	h^{-1} Mpc	Universumi paisumisega kaasaliikuvad koordinaadid
Temperatuur	K	Gaasiosakese temperatuur ($T > 100$ K)
Mass	$h^{-1} 10^{10} M_{\odot}$	Osakese mass
Grupi number	-	"Sõprade sõbrad"(FoF) algoritmiga leitud grupi number osakesele vaadeldavas hetktõmmises. Väärtused jäävad vahemikku 1 - N, kus N on kõikide leitud gruppide arv. Kui grupi number on 2^{30} , siis osake ei kuulu ühtegi gruppi.
Alamgrupi number	-	SUBFIND algoritmiga leitud alamgrupi number osakesele vaadeldavas hetktõmmises. Väärtused jäävad vahemikku 1-N, kus N on kõikide leitud alamgruppide arv. Kui alamgrupi number on 2^{30} , siis osake ei kuulu ühtegi alamgruppi. Kui osakese alamgrupi number on 0, siis ta asub tsentraalses alamgrupis.

kirjeldab grupi number, mis jääb vahemikku 1 kuni N , kus N on kõikide gruppide arv. Kui osakese grupi number on 2^{30} , siis ta ei kuulu ühessegi halosse. Väiksemaid gravitatsioonilisi struktuure nagu galaktikaid nimetatakse alamstruktuurideks (*substructure*) ja alamstruktuuridesse kuulumist kirjeldab alamgrupi number. Osakesed, mille alamgrupi number on 2^{30} , ei kuulu ühessegi alamgruppi (The EAGLE team, 2017).

Siin töös kasutatakse grupi ja alamgrupi numbrit, et eristada gaasi virialiseerunud struktuurides (ISM, CGM, ICM) ning väljaspool struktuure (IGM). Eristamine on oluline, kuna gaasi temperatuur sõltub keskkonnast, kus gaas asub.

2.2 Bisous' mudel

Bisous' mudel modelleerib galaktikate jaotuse põhjal suuremastaabilist struktuuri. Bisous' mudel eeldab, et galaktikaid saab lokaalselt grupeerida väikestesse silindritesse ja neid silindreid kombineerides saab moodustada vaatlustes nähtavaid filamente. Seda muidugi juhul, kui naabruses olevad silindrid on üksteise suhtes hästi joondunud. (Tempel et al., 2016)

Bisous' mudel on olemuselt punktprotsess. Simulatsiooniruumi hakatakse ükshaaval Poissoni jaotuse põhjal lisama silindreid. Iga silindri küljes on marker, kus on info silindri raadiuse, pikkuse ja orientatsiooni kohta. Markerit väärtused valitakse samuti algselt Poissoni jaotusest. Pärast iga silindri lisamist arvutatakse, kas silindri lisamisel oli positiivne või negatiivne mõju.

Sõltuvalt mõju suurusest jäetakse silinder oma kohale, eemaldatakse või nihutatakse. (Tempel et al., 2016)

Mudeli lahend on stohhastiline: jooksutades erinevaid Monte Carlo simulatsioone saame iga kord veidi erineva filamentaarse võrgustiku. Stohhasilisus võimaldab meil aga leida korraga filamentaarse võrgustiku nii morfoloogilised kui ka statistilised karakteristikud. (Tempel et al., 2016)

Mudel arvutab filamendi tõenäosusvälja (*visit map*) koos filamendi orientatsiooniväljaga. Nende andmete põhjal leitakse punktid, mis defineerivad filamendi telje. Neid punktide kogumeid nimetatakse filamendi selgroogudeks (*filament spines*). Filamentide selgrood leitakse kahes etapis. Esiteks leitakse filamendi tõenäosusvälja abiga suurima tõenäosusega piirkonnad, kus filamendid asuvad. Järgmiseks kontrollitakse, et filamentide selgroogude orientatsioon oleks kooskõlas filamendi orientatsiooniväljaga. (Tempel et al., 2016)

Siin töös nimetame Bisous' mudeli poolt arvutatud diskreetset filamendi tõenäosusvälja edaspidi sageduskaardiks.

2.2.1 Sageduskaart (*visit map*)

Filamentide defineerimiseks luuakse Bisous' mudelis sageduskaart s.o konkreetsetes ruumpunktides arvutatud tõenäosusväli. Need punktid moodustavad ühtlase võre ja on omavahel eraldatud võresammuga s . Seda võre iseloomustavad kollased ringid joonisel 2.1.

Kui mingis võrepunktis on sageduskaardi väärtus kõrgem kui ette antud läviväärtus, siis öeldakse, et seda punkti läbib filament. Selles töös oleme valinud varasema kogemuse põhjal läviväärtuseks $\mathcal{L}_{vmap} = 0.05$ (Tempel et al., 2014). Sageduskaardi väärtus igas võrepunktis leitakse silindrite arvu järgi, mis läbivad seda punkti. (Tempel et al., 2016)

2.2.2 Andmed

Bisous' mudel arvutab EAGLE simulatsiooni Ref-L0100N1504 29nda ($z = 0$) hetktõmmise põhjal 20 sagedustabelit. EAGLE simulatsiooniruumi kanti sagedustabeli võre nõnda, et kokku on 16 777 216 võrepunkti ja võresammuks on $s = 0,26 h^{-1} \text{ Mpc}$.

Saamaks teada, kui suur on tõenäosus, et võrepunkti läbib filament, leiame, mitmes sageduskaardis on selles konkreetsetes punktis sageduskaardi väärtus kõrgem läviväärtusest $\mathcal{L}_{vmap} = 0,05$, ja jagame selle sageduskaartide arvuga.

Bisous' mudeli tagastatud sageduskaardid on stohhastilised. Hindamaks meetodi hajuvust, kasutame bootstrap-meetodit, mida kirjeldame peatükis 2.3 ja rohkem saab lugeda töö lisast A.

2.3 Bootstrap-meetodi rakendamine

Bisous' mudel arvutas EAGLE simulatsiooni galaktikate jaotuse põhjal 20 sageduskaarti. See tähendab, et simulatsiooniruumis on igas võrepunktis 20 sageduskaardi väärtust. Tähistame sageduskaardi X^i -ga, kus $i = 1, \dots, 20$. Ütleme, et sageduskaardi läviväärtusest $\mathcal{L}_{vmap} = 0,05$ suurema väärtusega punktid asuvad filamendis. Defineerin uue parameetri p_{xyz}^b , mis ütleb kui suure osa moodustavad need sageduskaardid ühes valimis, kus punktis $P(x, y, z)$ on sageduskaardi väärtus suurem läviväärtusest \mathcal{L}_{vmap} või võrdne sellega. Edaspidi nimetame seda parameetrit filamenti kuulumise tõenäosuseks.

Üldkogumi moodustavad 20 sageduskaarti: $\mathbf{X} = (X^1, \dots, X^{20})$. Esimese sammuna arvutame igas võrepunktis 20 sageduskaardi põhjal p_{xyz} väärtuse ja salvestame selle andmetabelisse. Üldkogumist \mathbf{X} moodustame 1000 bootstrap-valimit taasvaliku meetodiga nõnda, et igas valimis on 20 sageduskaarti. Seejärel arvutame igale punktile $P(x, y, z)$ p_{xyz}^{*b} väärtuse bootstrap-valimi \mathbf{X}_b^* põhjal. Lisaks defineerime suuruse δ_{xyz}^{*b} , mis ütleb, kui palju erineb bootstrap-valimi põhjal saadud p_{xyz}^{*b} esialgu arvutatud väärtusest p_{xyz} ehk

$$\delta_{xyz}^{*b} = p_{xyz}^{*b} - p_{xyz}.$$

Sedasi saame iga võrepunkti jaoks δ_{xyz} jaotuse.

Jaotustest saame leida igale võrepunktile 95% usaldusnivoo. Selleks, et leida usaldusnivoo igale võrepunktile, tuleb sorteerida jaotuse δ_{xyz} elemendid kasvavas järjekorras. 95% usaldusnivoo annavad δ_{xyz} jaotuse 0,025 ja 0,975 kvantiilid.

2.4 Andmete ettevalmistamine

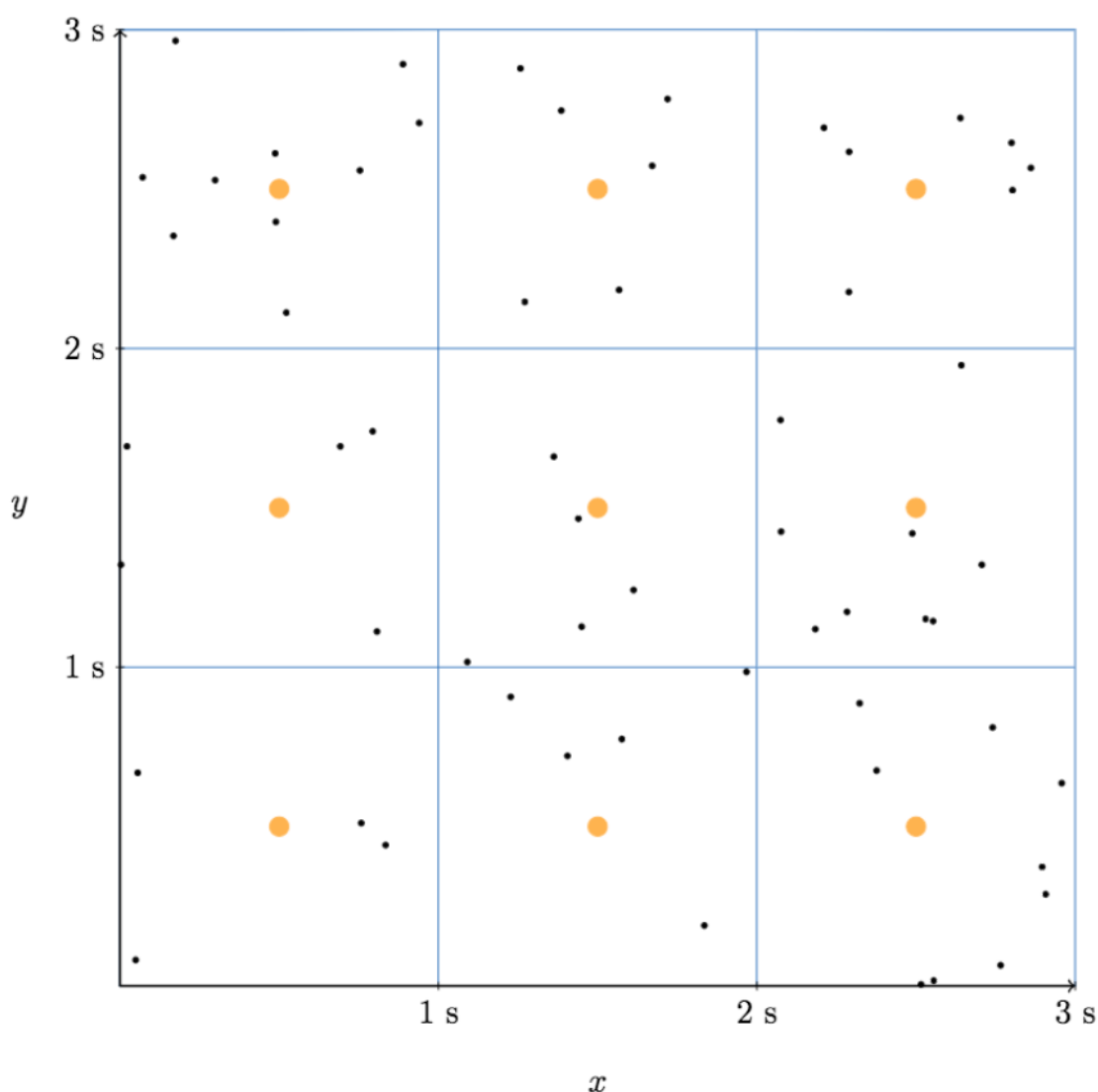
2.4.1 Bisous' mudeli andmete ja EAGLE-i simulatsiooni andmete kokkupanek

EAGLE-i simulatsioonist saame 255 HDF5 formaadis faili, mille suurused jäävad vahemikku 1.7 GB – 2.4 GB. Neist võtame välja gaasiosakeste koordinaadid, temperatuuri, grupi numbri ja alamgrupi numbri.

Saamaks teada, millised gaasiosakesed kuuluvad filamentidele, kasutame Bisous' mudelist saadud sageduskaartide põhjal arvutatud filamentaarse struktuuri tõenäosusvälja. Sageduskaartide põhjal arvutatud tõenäosusväli omab väärtusi vaid konkreetsetes ruumipunktides. Seetõttu tuleb igale gaasiosakesele leida talle lähim võrepunkt, kus tõenäosusvälja väärtus on arvutatud. Neid punkte illustreerivad kollased ringid joonisel 2.1.

Lähima võrepunkti leidmiseks konstrueerime simulatsiooniruumi uue võre nõnda, et kogu ruum jagatakse võrdseteks kuubikuteks küljepikkusega $s = 0,26 h^{-1} \text{ Mpc}$ ja kuubi keskele jääb punkt, kus on tõenäosusvälja väärtus teada. Seda võre illustreerib joonisel 2.1 sinine ruudustik. Ütleme, et kõik gaasiosakesed, mis asuvad ühes kuubikus, on filamentis sama suure tõenäosusega kui punkt, mis asub selle kuubiku keskel ja kus tõenäosusvälja väärtus on teada.

Käesoleva töö andmeanalüüsiks vajalik kood kirjutati programmeerimiskeeles Python.



Joonis 2.1: Gaasiosakestele lähima võrepunkti leidmine xy -tasandis. Mustade punktidega on tähistatud gaasiosakeste paiknemine xy -tasandis. Kollased ringid asuvad punktides, kus on teada filamentaarse struktuuri tõenäosusvälja väärtused. Sinine võre jaotab ruumi võrdse suurusega kuubikuteks, mille küljepikkus on $s = 0,26 h^{-1} \text{Mpc}$. Ühes kuubikus paiknevad gaasiosakesed asuvad filamendis sama suure tõenäosusega kui vastava kuubiku keskel asuv punkt, kus tõenäosusvälja väärtus on teada.

2.4.2 Lõplikud andmed

Üks meie eesmärkidest on uurida, millise temperatuuriga gaas asub kõige tõenäolisemalt filamendis. Selleks jagame gaasi osakeste minimaalse ja maksimaalse temperatuur vahemiku 1000 osaks logaritmilisel skaalal. Me vaatame gaasi temperatuurivahemikus $10^2 \text{ K} - 10^9 \text{ K}$. Kogu gaasi mass on $4,02 \cdot 10^{15} h^{-1} M_{\odot}$.

Teame iga gaasiosakese filamenti kuulumise tõenäosust. Kuna tõenäosuste arvutamiseks oli vaid 20 sageduskaarti, siis on tõenäosus sammuga 0,05. Loome tabeli, mille veerud tähistavad temperatuurivahemikke ja read filamenti kuulumise tõenäosust. Tabelisse tuleb 1000 veergu ning 20 rida. Iga tabeli lahtri jaoks arvutame vaadeldavasse temperatuurivahemikku jäävate ja vastava tõenäosusega filamendis asuvate osakeste massi. Lõplikke andmetabeleid iseloomustavad joonised 3.3 ja 3.4.

3 Tulemused

Järgmised tulemused on arvutatud EAGLE simulatsiooni andmete põhjal kosmoloogilisel punanihkel $z = 0$, mis on käesolev hetk Universumis.

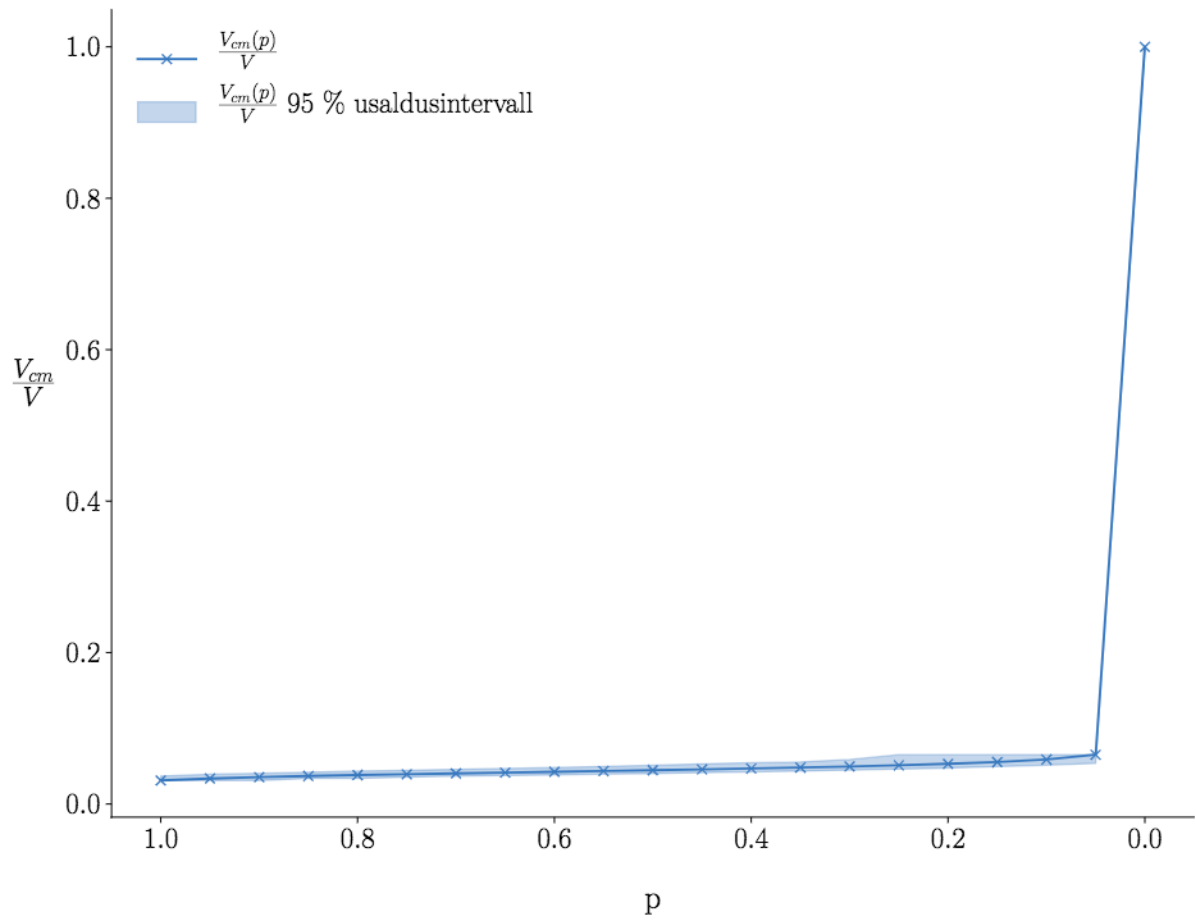
Tulemustes eristatakse virialiseerunud struktuurides asuvat gaasi ja väljaspool virialiseerunud struktuure asuvat gaasi. Virialiseerunud struktuuride all mõtleme käesolevas töös tähti, galaktikaid, galaktikate gruppe ja parvi. Filamendid ei ole virialiseerunud struktuurid, küll aga võivad virialiseerunud struktuurid asuda filamentides.

Kõik selles peatükis välja toodud joonised, kus x -teljel on temperatuur, on histogrammid, kus temperatuur vahemikus $10^2 \text{ K} - 10^9 \text{ K}$ on jagatud logaritmiliselt 1000 vahemikuks.

3.1 Filamendi tõenäosusväli

Bisous' mudeli sageduskaartide põhjal arvutatud filamendi tõenäosusvälja uurides näeme, et filamendid võtavad enda alla vaid väga väikese osa simulatsiooniruumist. Filamentaarne struktuur moodustab vähem kui 7% kogu ruumalast. Ruumi osa, kus filamendi asumise tõenäosus on 1, moodustab 3,1% – 3,7% kogu simulatsiooniruumist ja ruumi osa, kus filamendi eksisteerimise tõenäosus on 0, moodustab koguni 93,5% – 94,5% kogu simulatsiooniruumist.

Joonisel 3.1 on kujutatud kumulatiivse filamendaarse struktuuri ruumala kasvu tõenäosuse vähenemise suunas. Joonisel 3.1 on välja toodud bootstrap-meetodi abil saadud 95% usaldusnivoo alam- ja ülempiirid.



Joonis 3.1: Filamentaarse struktuuri kumulatiivse ruumala osa kogu ruumalast sõltuvalt filamendi tõenäosusest. x -teljele on kantud tõenäosus (p), et ruumis asub filament ja y -teljele on kantud kumulatiivse ruumala osa kogu ruumalast ($\frac{V_{cm}}{V}$). Kumulatiivne ruumala kasvab tõenäosuse kahanemise suunas. Jooniselt on hästi näha, et valdav osa simulatsiooniruumist ei ole kaetud filametaarse struktuuriga.

3.2 Gaasi massijaotus EAGLE simulatsioonis

Uurides kogu gaasi EAGLE simulatsioonis, leidsime, et kõige rohkem on gaasi temperatuurivahemikus $5,0 \cdot 10^5 \text{ K} - 5,1 \cdot 10^5 \text{ K}$ ja 95% kogu gaasist asub temperatuurivahemikus $1,3 \cdot 10^3 \text{ K} - 2,2 \cdot 10^7 \text{ K}$.

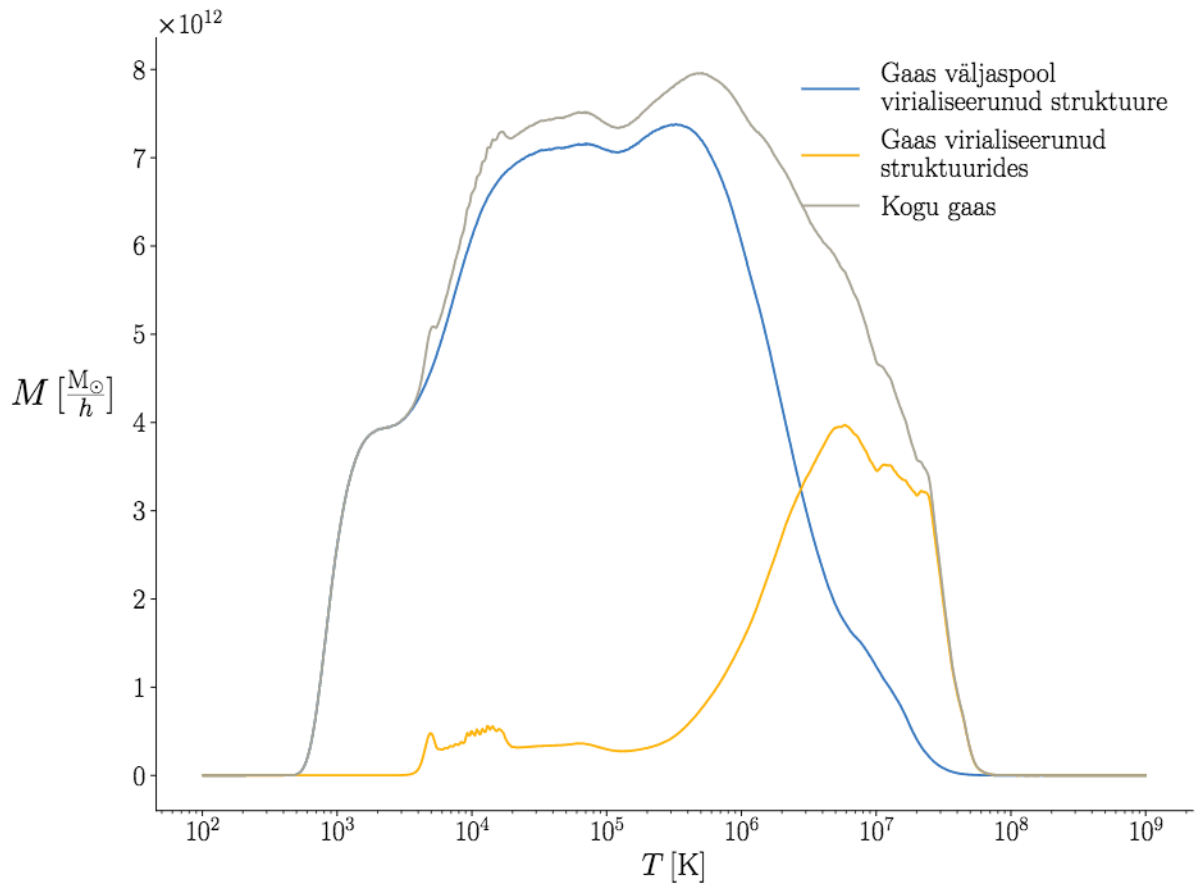
Kosmilist gaasi domineerib temperatuurini $2,8 \cdot 10^6 \text{ K}$ virialiseerunud struktuuridest väljaspool olev gaas (IGM), mis moodustab kogu gaasist 78,5%. IGM on hajus gaas, mis asub filamentides ja tühikutes. Seda on täpsemalt kirjeldatud peatükis 1.2.3.

Alates temperatuurist $2,8 \cdot 10^6 \text{ K}$ on domineerivaks komponendiks virialiseerunud struktuurides (ISM, ICM, CGM) asuv gaas. Virialiseerunud struktuurides asuv gaas moodustab kogu gaasist

21,5%.

Jooniselt 3.2 näeme temperatuuri $T \sim 10^4$ K ümbruses virialiseerunud struktuurides väikest gaasi koguse kasvu. See on kooskõlas varasemate uurimustulemustega, mille kohaselt ümbritseb massiivseid galaktikaid külm gaas, mille temperatuur on $T \sim 10^4$ K (Cantalupo, 2017). Seega iseloomustab see piirkond arvatavasti galaktikate halode gaasi (CGM), millest oli juttu peatükis 1.2.3.

Lisaks näeme suuremat gaasikogust virialiseerunud struktuurides temperatuurivahemikus 10^6 K – 10^8 K. Nimetatud temperatuurivahemikku jääb kuum galaktikaparvede gaas (ICM), mida saame võrdlemisi hästi uurida röntgenvaatlustega. See piirkond iseloomustab tõenäoliselt parvede gaasi. Parvede gaasi on kirjeldatud peatükis 1.2.3.



Joonis 3.2: Gaasi massijaotus EAGLE simulatsioonis. x -teljele on kantud temperatuurivahemikud ja y -teljele mass Päikese massides. Kõige rohkem on gaasi temperatuurivahemikus $5,0 \cdot 10^5$ K – $5,1 \cdot 10^5$ K. Temperatuurivahemikus $1,3 \cdot 10^3$ K – $2,2 \cdot 10^7$ K asub 95% kogu gaasist.

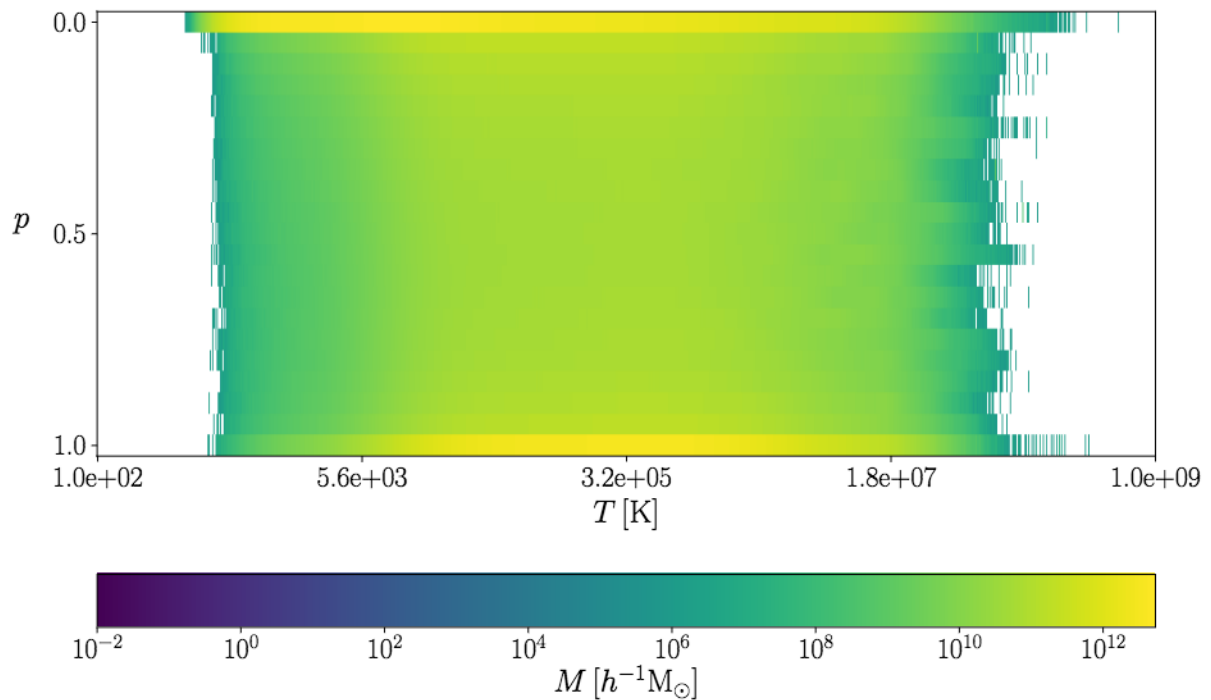
3.3 Gaasi massijaotus filamentides

Siin alapeatükis toodud arvulised vahemikud on antud bootstrap-meetodiga leitud 95%-lise usaldusnivooga.

Kokku moodustab gaasi mass filamentides $1,8 \cdot 10^5 M_{\odot} - 2 \cdot 10^5 M_{\odot}$. Kõige rohkem on gaasi temperatuuril $7,6 \cdot 10^5 \text{ K} - 8,5 \cdot 10^5 \text{ K}$ ja 95% kogu gaasist filamentides asub temperatuurivahemikus $1,6 \cdot 10^4 \text{ K} - 3 \cdot 10^7 \text{ K}$.

Filamentaarsetes struktuurides asuv gaas moodustab kogu simulatsiooniruumi gaasist 44,7% – 50,4%. Filamentaarsetes struktuurides olevast gaasist 35,7% – 37,1% asub virialiseerunud struktuurides ja 62,9% – 64,3% väljaspool virialiseerunud struktuure.

Joonistel 3.3 ja 3.4 on toodud gaasi massijaotus temperatuuri ning filamendis asumise tõenäosuse järgi.

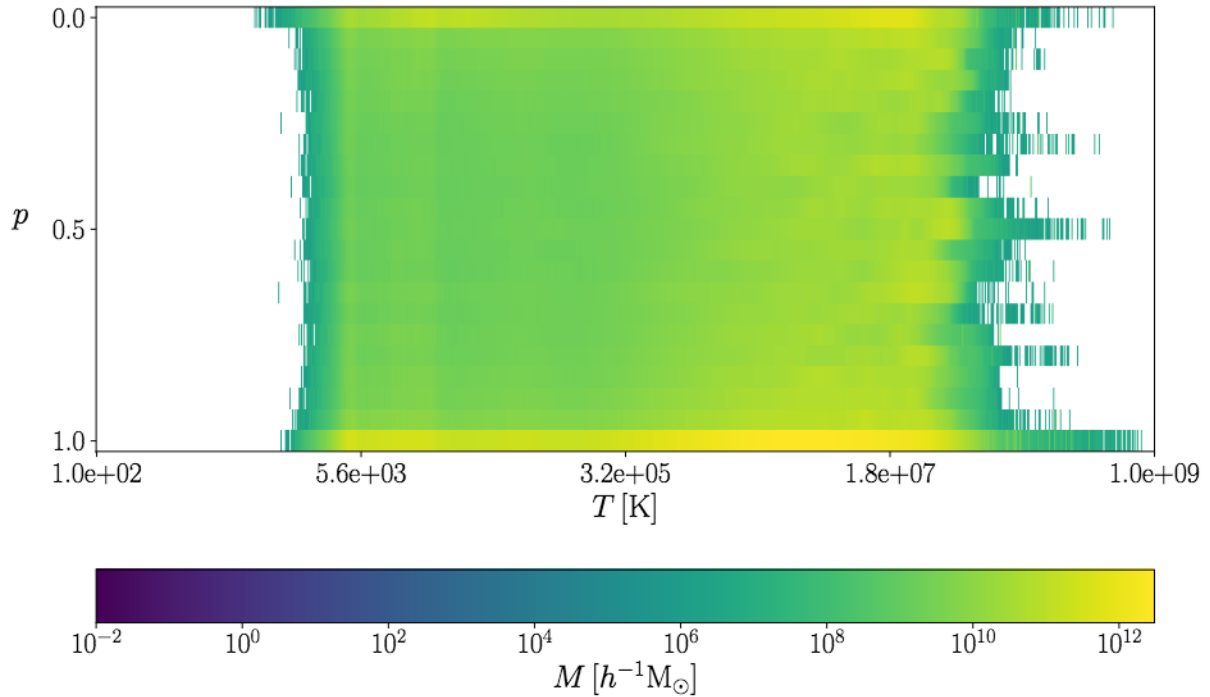


Joonis 3.3: Väljaspool virialiseerunud struktuure asuva gaasi massijaotus temperatuuri ning filamendis asumise tõenäosuse järgi. x -teljel on gaasi temperatuurivahemikud ja y -teljel on tõenäosus, et gaas asub filamendis. M -ga tähistame gaasi osakeste kogu massi, mis asuvad tõenäosusega p filamendis nõnda, et nende temperatuur on ligikaudu T .

Joonisel 3.3 kujutatakse gaasi, mis ei kuulu ei galaktikatesse ega galaktikagruppidesse. Jooniselt on näha, et madalama temperatuuriga gaas asub väiksema tõenäosusega filamendis.

Joonisel 3.4 kujutatakse galaktikates ja/või galaktikagruppides asuvat gaasi. Jooniselt 3.4 on näha, et galaktikates ja galaktikagruppides olevat gaasi on rohkem kõrgematel temperatuuridel kui joonisel 3.3.

Nii joonisel 3.3 kui ka joonisel 3.4 on näha, et suurem osa gaasist on temperatuurivahemikus $10^3 - 10^7$ K. Lisaks näeme, et alates temperatuurist 10^8 K-le on vähe gaasi. See on põhjuseks, miks me näeme joonisel 3.7 palju müra, kui temperatuur läheneb 10^8 K.



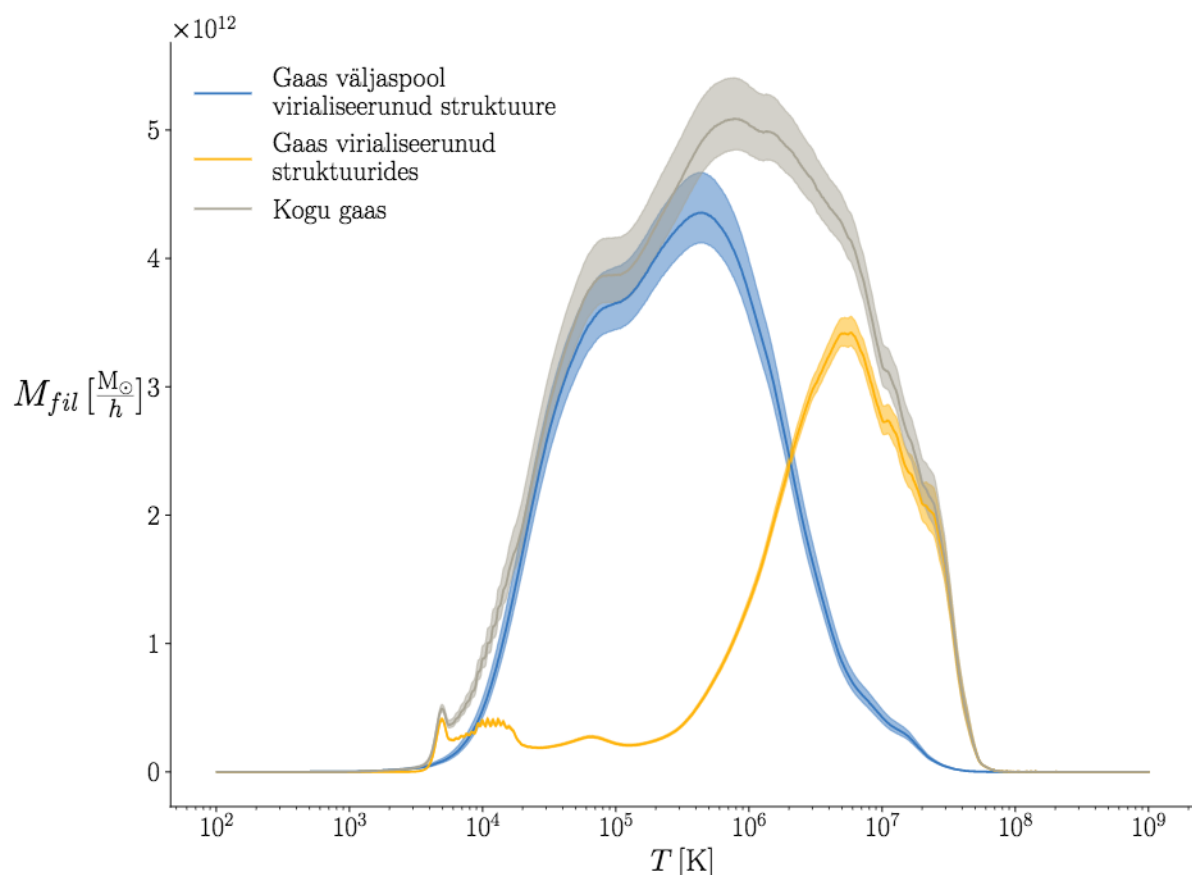
Joonis 3.4: Virialiseerunud struktuurides asuva gaasi massijaotus temperatuuri ning filamendis asumise tõenäosuse järgi. x -teljel on gaasi temperatuurivahemikud Kelvinites ja y -teljel on tõenäosus, et gaas asub filamendis. M -ga tähistame gaasiosakeste kogu massi, mis asuvad tõenäosusega p filamendis nõnda, et nende temperatuur on ligikaudu T .

Filamentaarses struktuuris (vt joonis 3.5) on virialiseerunud struktuurides asuval gaasil suurem massi osakaal kui kogu simulatsiooniruumis (vt joonis 3.2). See on ka oodatav tulemus, kuna Bisous' mudel otsib filamente galaktikate jaotuse põhjal.

Hindamaks, kuidas jälitab galaktikatega mitteseotud gaas filamente, peame eemaldama andmestikust parvede ja galaktikatega seotud gaasi. Seetõttu räägime edaspidi vaid gaasist väljaspool virialiseerunud struktuure ehk galaktikatevahelisest gaasist (IGM).

Kogu simulatsiooniruumi galaktikatevahelisest gaasist asub filamentides 35,8% – 41,3%. Sellest saame järeldada, et gaasijaotus on kooskõlas Bisous' mudeliga leitud filamentearse võrgustikuga, sest suur osa simulatsioonis olevast gaasist on koondunud filamentide poolt defineeritud

ruumipiirkondadesse. Need piirkonnad aga võtavad enda alla vähem kui 7% kogu ruumalast (vt joonis 3.1).



Joonis 3.5: Filamentides asuva gaasi massijaotus sõltuvalt temperatuurist EAGLE simulatsioonis. x -teljele on kantud temperatuurivahemikud ja y -teljele filamentides asuva gaasi mass Päikese massides.

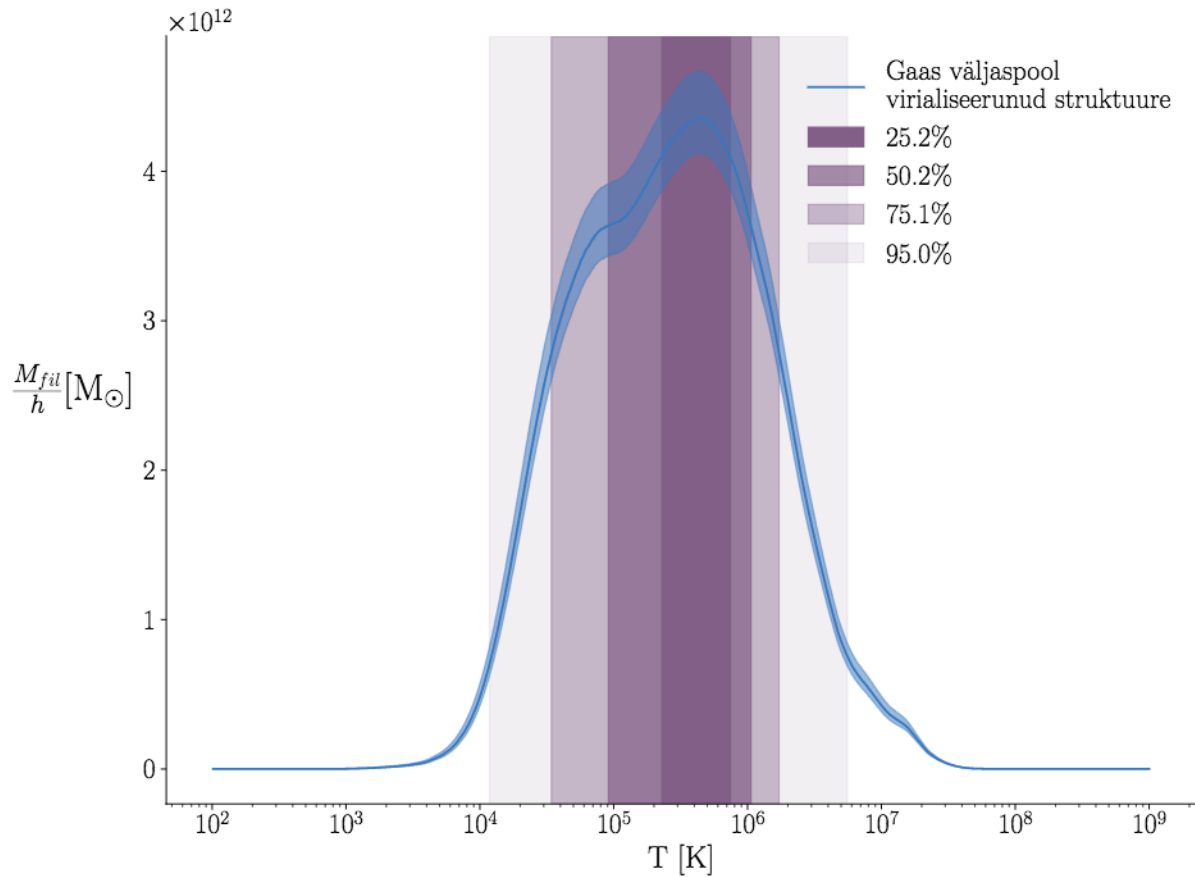
3.3.1 Gaasi temperatuurivahemikud massiprotsendi järgi

Joonisel 3.6 on toodud välja väljaspool virialiseerunud struktuure asuva gaasi massiprotsentidele vastavad temperatuurivahemikud.

Kõige rohkem on galaktikatevahelist gaasi filamentides temperatuuril $4,4 \cdot 10^5$ K. 25% gaasist asub temperatuurivahemikus $2,3 \cdot 10^5$ K – $7,4 \cdot 10^5$ K. 50% gaasist asub temperatuurivahemikus $9,1 \cdot 10^4$ K – $1,1 \cdot 10^6$ K. 75% gaasist asub temperatuurivahemikus $3,4 \cdot 10^4$ K – $1,7 \cdot 10^6$ K ja 95% gaasist asub temperatuurivahemikus $1,2 \cdot 10^4$ K – $5,6 \cdot 10^6$ K. Täpsemalt saab vaadata tabelist 3.1.

Tabel 3.1 on kokku pandud kolmest tabelist. Esimesed kolm veergu on saadud tõenäosusvälja abil, mis on leitud Bisous' mudeli poolt arvatud 20 sagedustabli põhjal. Ülejäänud veerud on

arvutatud tõenäosusväljade abil, mis on leitud bootstrap-meetodiga esialgsetest sagedustabelitest.



Joonis 3.6: Filamentides asuva gaasi massijaotus sõltuvalt temperatuurist EAGLE-i simulatsioonis. Joonisel vaadeldakse vaid gaasi, mis asub filamentaarses struktuuris ega kuulu virialiseerunud struktuuridesse. Lisatud on temperatuurivahemikud, kus asub $p\%$ kogu gaasist, mis asub filamentaarses struktuuris ega kuulu virialiseerunud struktuuridesse.

3.4 Gaasi filamendis asumise tõenäosus

Leidmaks, mis tõenäosusega asub konkreetses temperatuurivahemikus olev gaas filamendis, korrutame iga osakese massi läbi filamendis asumise tõenäosusega p ja liidame kokku ühe temperatuurivahemiku korrutised. Seejärel jagame saadud summa temperatuurivahemikus asuvate gaasiosakeste kogu massiga läbi. Nii saame teada, kui suure osa moodustab konkreetses temperatuurivahemikus filamendis olev gaas kogu gaasist selles temperatuurivahemikus.

Joonisel 3.7 on välja toodud iga temperatuurivahemiku jaoks tõenäosus, et gaas vaadeldavas temperatuurivahemikus asub filamendis. Oleme huvitatud peamiselt gaasist väljaspool virialiseerunud struktuure, kuid võrdluseks lisasime joonisele ka kogu gaasi tõenäosusjaotuse.

Tabel 3.1: Tabelis on esitatud temperatuurivahemikud, kus asub $p\%$ kogu gaasist, mis asub filamentides ega kuulu virialiseerunud struktuuridesse. $p\%$ tähistab vaadeldavat massiprotsenti. T_l on alumine temperatuur ja T_r on ülemine temperatuur. Tabeli esimesed 3 veergu on saadud Bisous' mudeli poolt arvutatud 20 sagedustabeli põhjal leitud tõenäosusvälja abil. Järgmised 6 veergu on arvutatud esialgsetest sagedustabelitest Bootstrap-meetodiga leitud tõenäosusväljade abil.

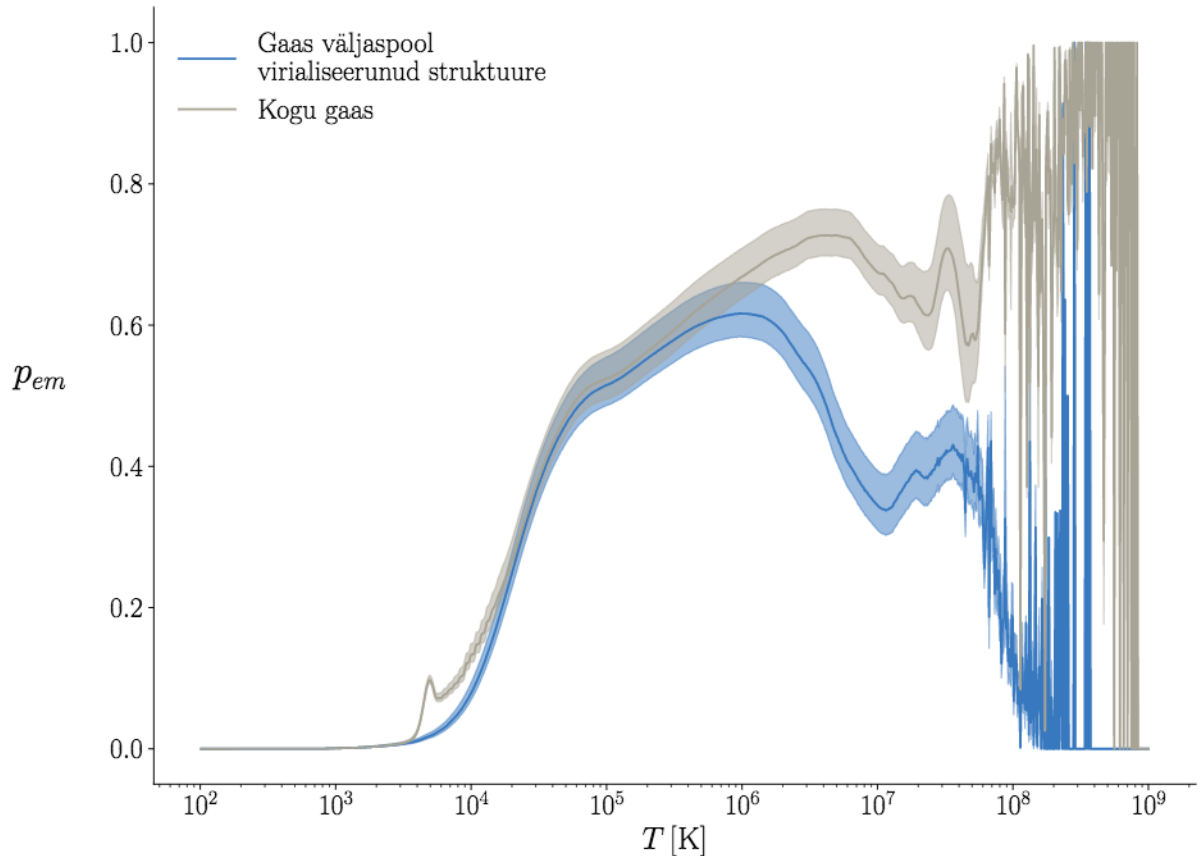
Algsed sagedustabelid			95% alumine usaldusintervall			95% ülemine usaldusintervall		
$p\%$	T_l	T_r	$p\%$	T_l	T_r	$p\%$	T_l	T_r
5.1	3.8e+05	4.9e+05	5.1	3.9e+05	5.0e+05	5.0	3.8e+05	4.9e+05
10.1	3.4e+05	5.5e+05	10.2	3.5e+05	5.6e+05	10.3	3.4e+05	5.5e+05
15.1	3.0e+05	6.0e+05	15.2	3.1e+05	6.1e+05	15.3	3.0e+05	6.0e+05
20.3	2.6e+05	6.7e+05	20.2	2.7e+05	6.7e+05	20.1	2.6e+05	6.6e+05
25.2	2.3e+05	7.4e+05	25.0	2.3e+05	7.3e+05	25.2	2.3e+05	7.4e+05
30.2	2.0e+05	8.2e+05	30.1	2.0e+05	8.2e+05	30.2	2.0e+05	8.2e+05
35.2	1.7e+05	8.9e+05	35.1	1.7e+05	8.9e+05	35.1	1.7e+05	8.9e+05
40.3	1.4e+05	9.6e+05	40.3	1.5e+05	9.8e+05	40.2	1.4e+05	9.6e+05
45.2	1.2e+05	1.0e+06	45.3	1.2e+05	1.0e+06	45.1	1.2e+05	1.0e+06
50.1	9.4e+04	1.1e+06	50.2	9.6e+04	1.1e+06	50.2	9.1e+04	1.1e+06
55.2	7.5e+04	1.1e+06	55.0	7.7e+04	1.1e+06	55.3	7.2e+04	1.1e+06
60.2	6.1e+04	1.2e+06	60.1	6.3e+04	1.2e+06	60.2	5.9e+04	1.2e+06
65.0	5.1e+04	1.3e+06	65.2	5.2e+04	1.3e+06	65.2	5.0e+04	1.3e+06
70.1	4.3e+04	1.5e+06	70.0	4.4e+04	1.5e+06	70.2	4.1e+04	1.5e+06
75.0	3.5e+04	1.7e+06	75.0	3.6e+04	1.7e+06	75.1	3.4e+04	1.7e+06
80.1	2.9e+04	2.0e+06	80.2	3.0e+04	2.0e+06	80.1	2.8e+04	2.0e+06
85.0	2.3e+04	2.4e+06	85.1	2.4e+04	2.4e+06	85.1	2.2e+04	2.5e+06
90.0	1.8e+04	3.3e+06	90.0	1.9e+04	3.2e+06	90.0	1.7e+04	3.4e+06
95.1	1.2e+04	5.4e+06	95.0	1.3e+04	5.2e+06	95.0	1.2e+04	5.6e+06

Alates temperatuurist $T \sim 4 \cdot 10^7$ K, on joonisel palju müra, kuna gaasiosakeste arv on liiga madal. Seda kinnitavad ka joonised 3.3, 3.2 ja 3.5.

Joonisel 3.7 on näha tõenäosusjaotuses lokaalset miinimumi temperatuuril $T \sim 10^7$ K. Pärast seda on näha väikest tõenäosuse kasvu. Jooniselt 3.5 on näha, et temperatuuri $T \sim 10^7$ K juures on gaasi mass väljaspool virialiseerunud struktuure juba väga väike. Seetõttu on arukas lõpetada joonise uurimine lokaalse miinimumi juures ($T = 1,1 \cdot 10^7$ K), kuna edasi on arvatavasti lihtsalt müra.

Müra tõenäoliselt põhjuseks on, et väljaspool virialiseerunud struktuure olev gaas on suurtel temperatuuridel virialiseerunud struktuuridele lähedal, kuid haloleidjad EAGLE-i simulatsioonis ei määranud neid gaasiosakesi halodesse.

Temperatuurivahemikus $5,1 \cdot 10^4$ K – $4,8 \cdot 10^6$ K on gaasi filamendis eksisteerimise tõenäosus vähemalt 0.5. Temperatuurivahemikus $2,2 \cdot 10^5$ K – $2,7 \cdot 10^6$ K on gaasi filamendis eksisteerimise tõenäosus vähemalt 0.6. Kõige tõenäolisemalt asub filamendis gaas temperatuurivahemikus $9,6 \cdot 10^5$ K – $9,8 \cdot 10^5$ K.



Joonis 3.7: Erinevatel temperatuuridel oleva gaasi tõenäosus asuda filamentides. x -teljele on kantud temperatuurivahemikud ja y -teljele on kantud empiiriline tõenäosus, et mingis temperatuurivahemikus olev gaas asub filamendis.

Kuigi on näha trendi temperatuuri ja filamendis paiknemise tõenäosuse vahel, ei ole see kuigi tugev, et saaks gaasi temperatuuri põhjal filamente otsida.

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli uurida, kuidas on kosmiline gaas ja filamentaarne struktuur omavahel seotud. Filamentide detekteerimiseks kasutasime stohhastilist Bisous' mudelit, mis leidis filamentide tõenäosusvälja galaktikate jaotuse põhjal.

Lõpptulemustest eemaldasime galaktikate parvede gaasi (ICM), kuna parved on eraldiseisvad struktuurid. Lisaks eemaldasime galaktikatega seotud gaasi (ISM, CGM), kuna filamendiotsija leiab filamente galaktikate jaotuse põhjal ja seega järgib galaktikates asuv gaas filamentaarset struktuuri juba eelduste kohaselt hästi.

Töös keskendusime galaktikatevahelisele gaasile (IGM), mida on otsestest vaatlustest keeruline uurida ja seetõttu kasutasime kosmoloogilise simulatsiooni EAGLE-i andmeid.

Analüüsi käigus leidsime, et kuigi filamentaarne struktuur võtab enda alla vähem kui 7% kogu simulatsiooni ruumalast, asub seal 35,8% – 41,3% kogu simulatsiooniruumis asuvast galaktikatevahelisest gaasist. Sellest järeldasime, et virialiseerunud struktuuridest väljaspool asuv gaas järgib hästi Bisous' meetodiga leitud filamentaarset võrgustikku.

Leidsime, et kõige rohkem on filamentides galaktikatevahelist gaasi temperatuuril $4,4 \cdot 10^5$ K, kusjuures 95% filamentides asuvast galaktikatevahelisest gaasist asub temperatuurivahemikus $1,2 \cdot 10^4$ K – $5,6 \cdot 10^6$ K.

Kõige tõenäolisemalt asub filamendis gaas temperatuurivahemikus $9,6 \cdot 10^5$ K – $9,8 \cdot 10^5$ K. Sellise temperatuuriga gaasi jaoks on filamendis asumise tõenäosus 0,6.

Kokkuvõttes saame öelda, et galaktikatevaheline gaas järgib hästi Bisous' mudeliga leitud filamentaarset struktuuri. Kuigi on näha trendi temperatuuri ja filamendis eksisteerimise tõenäosuse vahel, ei ole see kuigi tugev, et saaks gaasi temperatuuri põhjal hakata filamente otsima.

A Bootstrap-meetod

Bootstrap-meetod on statistiline meetod hindamaks üldkogumi \mathbf{X} uuritava statistilise parameetri θ (keskväärtus, standardhälve, mediaan jne.) variatsiooni. Olemasolevate andmete põhjal luuakse alamvalimeid \mathbf{X}_b^* ja iga valimi jaoks arvutatakse statistiline parameeter θ_b^* . Alamvalimite parameetrite põhjal saadakse statistilise parameetri θ jaotus.

Valimid luuakse taasvaliku meetodiga (*sampling with replacement*).

A.1 Valimi suurus ja valimite arv

On tavaks saanud, et valimi suurus on võrdne üldkogumi suurusega. See on intuitiivne, kuna soovime leida statistilise parameetri θ dispersiooni. Dispersioon sõltub aga valimi suurusest.

Väiksemat valimi suurust kasutatakse, kui üldkogum on liiga suur ja see muudaks bootstrap-meetodi kasutamise arvutuslikult keerukaks.

Valimite arv peab olema piisavalt suur, et saada korralik hinnang statistilistele parameetritele. Mida suurem on valimite arv, seda parema hinnagu saab leida statistilistele parameetritele.

A.2 Algoritmi kirjeldus

Olgu üldkogum $\mathbf{X} = x_i$, kus $i = 1, \dots, n$. Tähistame θ -ga huvipakkuvat üldkogumi parameetrit. Leidmaks hinnangu parameetrile θ , kasutame Bootstrap-meetodit. bootstrap-meetodi algoritm toimib järgmiselt:

1. Otsustatakse mitu bootstrap-valimit luuakse. Tähistame B -ga valimite arvu. Alljärgnevaid alampunkte tehakse läbi B korda.
 - (a) Konstrueeritakse valim $\mathbf{X}_b^* = x_i^*$ nõnda, et valimi elemendid on pärit algsest üldkogumist \mathbf{X} . Elemente valitakse üldkogumist taasvaliku meetodil. See tähendab,

et mistahes element üldkogumist X saab osutada mitu korda valituks valimisse X_b^* .

(b) Arvutatakse valimi X_b^* põhjal huvipakkuv statistiline parameeter θ_b^* .

2. Leitakse uuritava parameetri θ jaotus alamvalimitest saadud $\theta_1, \dots, \theta_B$ põhjal.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Antti Tamme huvitava uurimusteema, heade soovitude, positiivse suhtumise ja arvukate paranduste eest magistritöö kirjutamise ajal. Samuti tänan oma teist juhendajat Elmo Tempelit paljude paranduste, abivalmiduse ja sisukate märkuste eest.

Lisaks tänan Gutnar Leedet, Maarja Kruuset, Toni Kalevi Tuomineni, Moorits Mihkel Muru ja Jukka Nevalainenit jagatud teadmiste ning abi eest.

Suur tänu läheb Mirt Kruusmaale töö keelelise toimetamise eest.

Kõige lõpuks tänan oma vanemaid, kes on alati minu jaoks olemas.

Grete-Lilijane Küppas

Kirjandus

- Aragon-Calvo, M. A., Neyrinck, M. C., and Silk, J. (2016). Galaxy Quenching from Cosmic Web Detachment. *arXiv e-prints*, page arXiv:1607.07881.
- Bregman, J. N. (2007). The Search for the Missing Baryons at Low Redshift. , 45(1):221–259.
- Cantalupo, S. (2017). Gas Accretion and Giant Ly α Nebulae. In Fox, A. and Davé, R., editors, *Gas Accretion onto Galaxies*, volume 430 of *Astrophysics and Space Science Library*, page 195.
- Cautun, M., van de Weygaert, R., Jones, B. J. T., and Frenk, C.Š. (2014). Evolution of the cosmic web. , 441:2923–2973.
- Colless, M., Peterson, B. A., Jackson, C., Peacock, J. A., Cole, S., Norberg, P., Baldry, I. K., Baugh, C. M., Bland-Hawthorn, J., Bridges, T., Cannon, R., Collins, C., Couch, W., Cross, N., Dalton, G., De Propriis, R., Driver, S. P., Efstathiou, G., Ellis, R.Š., Frenk, C.Š., Glazebrook, K., Lahav, O., Lewis, I., Lumsden, S., Maddox, S., Madgwick, D., Sutherland, W., and Taylor, K. (2003). The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release. *arXiv e-prints*, pages astro-ph/0306581.
- Crain, R. A., Schaye, J., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Dalla Vecchia, C., Frenk, C.Š., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., and Trayford, J. W. (2015). The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations. , 450(2):1937–1961.
- GELLER, M. J. and HUCHRA, J. P. (1989). Mapping the universe. *Science*, 246(4932):897–903.
- Gott, III, J. R., Jurić, M., Schlegel, D., Hoyle, F., Vogeley, M., Tegmark, M., Bahcall, N., and Brinkmann, J. (2005). A Map of the Universe. , 624:463–484.
- Huchra, J. P., Macri, L. M., Masters, K. L., Jarrett, T. H., Berlind, P., Calkins, M., Crook, A. C., Cutri, R., Erdoğdu, P., Falco, E., George, T., Hutcheson, C. M., Lahav, O., Mader, J., Mink, J. D., Martimbeau, N., Schneider, S., Skrutskie, M., Tokarz, S., and Westover, M. (2012). The 2MASS Redshift Survey Description and Data Release. , 199:26.

- Jõeveer, M., Einasto, J., and Tago, E. (1978). Spatial distribution of galaxies and of clusters of galaxies in the southern galactic hemisphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 185(2):357–370.
- Knebe, A., Gill, S. P. D., Gibson, B. K., Lewis, G. F., Ibata, R. A., and Dopita, M. A. (2004). Anisotropy in the Distribution of Satellite Galaxy Orbits. , 603:7–11.
- Lacey, C. and Cole, S. (1994). Merger Rates in Hierarchical Models of Galaxy Formation - Part Two - Comparison with N-Body Simulations. , 271:676.
- Libeskind, N. I., van de Weygaert, R., Cautun, M., Falck, B., Tempel, E., Abel, T., Alpaslan, M., Aragón-Calvo, M. A., Forero-Romero, J. E., Gonzalez, R., Gottlöber, S., Hahn, O., Hellwing, W. A., Hoffman, Y., Jones, B. J. T., Kitaura, F., Knebe, A., Manti, S., Neyrinck, M., Nuza, S. E., Padilla, N., Platen, E., Ramachandra, N., Robotham, A., Saar, E., Shand arin, S., Steinmetz, M., Stoica, R.Š., Sousbie, T., and Yepes, G. (2018). Tracing the cosmic web. , 473(1):1195–1217.
- Lietzen, H., Tempel, E., Liivamägi, L. J., Montero-Dorta, A., Einasto, M., Streblyanska, A., Maraston, C., Rubiño-Martín, J. A., and Saar, E. (2016). Discovery of a massive supercluster system at $z \sim 0.47$. , 588:L4.
- Mo, H., van den Bosch, F., and White, S. (2010). *Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge University Press.
- Planck Collaboration (2018). Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck. *arXiv e-prints*, page arXiv:1807.06205.
- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Vecchia, C. D., Frenk, C.Š., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., Baes, M., Booth, C. M., Camps, P., Navarro, J. F., Qu, Y., Rahmati, A., Sawala, T., Thomas, P. A., and Trayford, J. (2014). The eagle project: Simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments.
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., Frenk, C.Š., Yoshida, N., Gao, L., Navarro, J., Thacker, R., Croton, D., Helly, J., Peacock, J. A., Cole, S., Thomas, P., Couchman, H., Evrard, A., Colberg, J., and Pearce, F. (2005). Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. , 435:629–636.
- Tegmark, M., Blanton, M. R., Strauss, M. A., Hoyle, F., Schlegel, D., Scoccimarro, R., Vogeley, M.Š., Weinberg, D. H., Zehavi, I., Berlind, A., Budavari, T., Connolly, A., Eisenstein, D. J., Finkbeiner, D., Frieman, J. A., Gunn, J. E., Hamilton, A. J.Š., Hui, L., Jain, B., Johnston, D., Kent, S., Lin, H., Nakajima, R., Nichol, R. C., Ostriker, J. P., Pope, A., Scranton, R., Seljak, U., Sheth, R. K., Stebbins, A., Szalay, A.Š., Szapudi, I., Verde, L., Xu, Y., Annis, J., Bahcall,

- N. A., Brinkmann, J., Burles, S., Castander, F. J., Csabai, I., Loveday, J., Doi, M., Fukugita, M., Gott, III, J. R., Hennessy, G., Hogg, D. W., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Lamb, D. Q., Lee, B. C., Lupton, R. H., McKay, T. A., Kunszt, P., Munn, J. A., O’Connell, L., Peoples, J., Pier, J. R., Richmond, M., Rockosi, C., Schneider, D. P., Stoughton, C., Tucker, D. L., Vanden Berk, D. E., Yanny, B., York, D. G., and SDSS Collaboration (2004). The Three-Dimensional Power Spectrum of Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 606:702–740.
- Tempel, E., Stoica, R.Š., Kipper, R., and Saar, E. (2016). Bisous model-Detecting filamentary patterns in point processes. *Astronomy and Computing*, 16:17–25.
- Tempel, E., Stoica, R.Š., Martínez, V. J., Liivamägi, L. J., Castellan, G., and Saar, E. (2014). Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS. , 438(4):3465–3482.
- The EAGLE team (2017). The EAGLE simulations of galaxy formation: Public release of particle data. *arXiv e-prints*, page arXiv:1706.09899.
- Turner, E. L. and Gott, III, J. R. (1976). Groups of galaxies. I. A catalog. , 32:409–427.
- van de Weygaert, R. (2014). Voids and the cosmic web: cosmic depression amp; spatial complexity. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 11(S308):493–523.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Grete-Lilijane Küppas,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Kosmiline gaas suuremastaabilises struktuuris,

mille juhendajad on Antti Tamm, PhD ja Elmo Tempel, PhD, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. olen teadlik, et punktis 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Grete-Lilijane Küppas,

Tartu, 3. juuni 2019. a.